



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

DEPARTAMENTO DE POSGRADOS

**“Evaluación de la cinética de adsorción de oro mediante carbones activados
en diferentes soluciones cianuradas”**

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de

Magíster en Minas con mención en Planeamiento Minero

Autor:

ALEXIS ADRIAN SÁNCHEZ MORA

Director:

EDUARDO ANDRÉS LUNA MÉNDEZ

CUENCA, ECUADOR

2025

Alexis Adrián Sánchez Mora

Trabajo de Titulación

Ing. Eduardo Andrés Luna Méndez

Noviembre, 2025

“Evaluación de la cinética de adsorción de oro mediante carbones activados en diferentes soluciones cianuradas”

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a las personas que día con día han sido mí refugio, apoyo constante y motivo de perseverancia, mi madre y mi padre, cuyo amor inagotable y consejos llenos de sabiduría me han impulsado siempre a seguir adelante, por brindarme su apoyo constante, su paciencia y su fortaleza en cada etapa de este proceso y por sostenerme en silencio con su apoyo incondicional.

También dedico este logro a mis docentes y mentores, quienes con su guía, exigencia y ejemplo enriquecieron no solo mi aprendizaje académico, sino también mi crecimiento personal, a mis compañeros de estudio y amigos, por compartir conmigo no solo aprendizajes académicos, sino también experiencias de vida que marcaron este proceso, este logro no es solo mío: pertenece a cada uno de ustedes, porque sin su amor, confianza y apoyo no habría sido posible.

Alexis Adrián Sánchez Mora

AGRADECIMIENTO

Con el corazón lleno de gratitud y amor, dedico este proyecto de investigación a las personas importantes de mi vida, aquellas que han sido mi refugio, mi fortaleza y mi inspiración en este camino.

En primer lugar, agradezco a Dios, quien me ha dado la fortaleza, salud y la sabiduría necesarias para alcanzar este logro, asimismo, quiero dedicar este logro a todas las personas que han acompañado mi camino: a mi familia, padres y hermanos por ser mi mayor fuente de motivación, por su amor incondicional y, además, por alentarme en los momentos de cansancio, así como por celebrar conmigo cada avance; a mis docentes y tutores académicos, por su paciencia, dedicación y por enseñarme no solo conocimientos, sino también el valor de la constancia y la perseverancia.; a mis amigos y compañeros, por las risas, la compañía y el apoyo que hicieron este proceso más ameno y especial; y, finalmente, a cada persona que me brindó un consejo, una palabra de aliento o simplemente estuvo a mi lado, a todos ustedes, les agradezco de corazón, ya que este logro también les pertenece.

Alexis Adrián Sánchez Mora

RESUMEN

El presente trabajo evalúa la cinética de adsorción de oro a partir de soluciones cianuradas utilizando diferentes tipos de carbones activados, con el propósito de comparar el desempeño de tres carbones comerciales frente a un carbón activado elaborado en laboratorio a partir de cascara de coco. La investigación se desarrolló mediante ensayos experimentales en laboratorio, aplicando modelos cinéticos de Pseudo- primer orden, Pseudo- segundo orden y difusión intraparticular para interpretar los mecanismos que gobiernan la adsorción.

Los resultados obtenidos demuestran que el carbón activado derivado de cascara de coco presenta una capacidad de adsorción en equilibrio (q_e) de 10.9 mg/g y una eficiencia de recuperación del 84.5%, posicionándose como una alternativa técnica viable frente a los carbones industriales, con ventajas económicas y ambientales.

Palabras clave: adsorción, oro, carbón activado, cascara de coco, cinética.



Ing. Eduardo Luna Méndez

Director del trabajo de titulación

ABSTRACT

The present study evaluates the gold adsorption kinetics from cyanide solutions using different types of activated carbons, with the purpose of comparing the performance of three commercial carbons against a laboratory-produced activated carbon derived from coconut shell. The research was conducted through laboratory experimental tests, applying kinetic models of pseudo-first order, pseudo-second order, and intraparticle diffusion to interpret the mechanisms governing adsorption.

The results obtained show that the activated carbon derived from coconut shell exhibits an equilibrium adsorption capacity (q_e) of 10.9 mg/g and a recovery efficiency of 84.5%, positioning it as a technically viable alternative to industrial carbons, with economic and environmental advantages.

Keywords: adsorption, gold, activated carbon, coconut shell, kinetics.



Ing. Eduardo Luna Méndez

Thesis Director

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTO.....	iv
RESUMEN.....	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
Introducción.....	1
CAPÍTULO 1.....	3
1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Planteamiento del problema.....	5
1.3. Justificación.....	6
1.4. Objetivos	7
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	7
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	7
1.4.3. <i>Planteamiento de la hipótesis</i>	7
CAPÍTULO 2.....	9
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	9
2.1. Generalidad de la adsorción.....	9
2.2. Reacciones heterogéneas	10
2.3. Carbonización.....	11

2.4.	Activación del carbón.....	12
2.5.	Soluciones de oro cianurado	12
2.6.	Carbón activado.....	13
2.7.	Carbón de cáscara de coco.....	14
2.8.	Características del oro.....	15
2.9.	Conceptualización del cianuro.....	15
2.10.	Proceso de cianuración usado	16
2.11.	Factores que afectan la lixiviación.....	17
2.12.	Tipos de carbón activado, estructura, elaboración y factores que afectan su funcionalidad	17
2.13.	Índices metalúrgicos	18
2.14.	Modelos cinéticos de adsorción	21
CAPÍTULO 3.....		23
3. METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE LABORATORIO		23
3.1.	Tipo de investigación.....	23
3.2.	Población y muestra de estudio.....	24
3.3.	Materiales y reactivos	24
3.4.	Síntesis y preparación del carbón activado de cáscara de coco	25
3.5.	Preparación de soluciones cianuradas de oro	27
3.6.	Ensayos de adsorción.....	33
3.7.	Determinación de concentración de oro.....	34
3.8.	Ánálisis estadístico	35

3.9. Procedimiento de seguridad y manejo de residuos.....	35
CAPÍTULO 4.....	37
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	37
4.1. Introducción	37
4.2. Análisis de la información obtenida.	38
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	44
Conclusiones.....	44
Recomendaciones.....	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
ANEXOS	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema conceptual de la reacción heterogénea en las adsorciones de oro sobre carbón activado en soluciones cianuradas.	10
Figura 2. Pesaje de cianuro de sodio (NaCN).....	29
Figura 3. Disolución bajo campana (matraz/vaso, etiqueta visible).	30
Figura 4. Ajuste de pH.	30
Figura 5. Preparación de Au.	31
Figura 6. Adición de Au a la solución cianurada y homogeneización.....	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.Resultados de la absorción.....	38
Tabla 2. Cinética de adsorción de oro.....	39
Tabla 3.Ajuste a los modelos cinéticos.....	42

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Cinética de adsorción del oro.....	39
Gráfico 2. Cinética de adsorción de oro qt1	40
Gráfico 3. Cinetica de adsorcion de oro qt2	40
Gráfico 4. Cinética de adsorción de oro qt3	41
Gráfico 5. Cinética de adsorción de oro qt4	41

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo. 1 Proceso de elaboración del carbón activado de cáscara de coco.....	54
Anexo. 2 Tabla de condiciones experimentales.....	55
Anexo. 3 Equipos de laboratorio.	56

Introducción

La recuperación de oro mediante procesos de adsorción en soluciones cianuradas constituye una de las etapas más relevantes en la hidrometalurgia moderna. En este contexto, el carbón activado se ha consolidado como el adsorbente más utilizado debido a su alta superficie, estructura micro porosa y selectividad hacia complejos metálicos como $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$. Sin embargo, la dependencia de carbonos activados industriales de alto costo y limitada disponibilidad local ha impulsado la búsqueda de materiales alternativos que mantengan una elevada eficiencia de adsorción, y al mismo tiempo, sean sostenibles y económicamente accesibles.

La cascara de coco representa una fuente renovable y abundante de carbono con características ideales para la producción de carbón activado, por su elevada densidad, dureza y bajo contenido de cenizas. Su utilización no solo promueve la valorización de residuos agroindustriales, sino que también contribuye a la disminución de los costos asociados al proceso de recuperación de metales preciosos. En este marco, resulta esencial analizar comparativamente el comportamiento cinético del carbón activado vegetal frente a los carbonos industriales, considerando factores como la concentración de cianuro, el tiempo de contacto y las propiedades fisicoquímicas del material.

El presente estudio tuvo como propósito evaluar la cinética de adsorción de oro en soluciones cianuradas, comparando un carbón activado de cascara de coco con tres carbonos activados industriales. Se aplicaron para esto, modelos cinéticos de pseudo- primer orden y pseudo- segundo orden, así como el modelo de difusión intraparticular, con el fin de determinar el mecanismo predominante de adsorción. Los ensayos experimentales se realizaron bajo condiciones controladas de pH, concentración de cianuro y tiempo, permitiendo establecer parámetros comparativos de adsorción, recuperación y eficiencia del proceso.

La presente investigación aporta evidencia técnica sobre viabilidad del uso de biomasa residual como adsorbente en la minería aurífera, promoviendo prácticas más sostenibles y de menor impacto económico, sin comprometer la eficacia metalúrgica en la recuperación de oro.

CAPÍTULO 1

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

La captura de metales preciosos, con énfasis en el oro, en soluciones cianuradas ha sido objeto de extensa investigación, considerándose un aspecto importante de los métodos hidrometalúrgicos empleados en la minería. Desde mediados del siglo XX, el carbón activado ha emergido como una de las estrategias más efectivas para la extracción de oro, debido a su notable capacidad de adsorción y su selectividad hacia los complejos de oro-cianuro en ambientes alcalinos (Kim et al., 2024).

Estudios demuestran que factores como el tamaño de las partículas, la temperatura, el pH y, en especial, la concentración de cianuro libre tiene un impacto significativo en la rapidez y efectividad de la adsorción del oro (Chen et al., 2021; Kong et al., 2022; Ahtiainen y Lundström, 2019; Mpinga et al., 2014; Snyders et al., 2014). (Khosravi et al., 2017) examinó la captura de oro a partir de soluciones cianuradas utilizando carbón activado producido a partir de cáscaras de coco. Se llevaron a cabo ajustes en diferentes condiciones de operación, tales como el pH, la velocidad de agitación, la cantidad de adsorbente, y el tiempo de contacto. Al aplicar las condiciones óptimas, se alcanzó una tasa de adsorción del 89.25 %. Se determinó que el modelo de pseudo-primer orden describía de manera más precisa la cinética del proceso, identificando la difusión a través de las partículas como la fase limitante. Adicionalmente, se analizaron las isotermas y se concluyó que el modelo de Freundlich era el más representativo.

Jia et al. (1998) evaluó la capacidad de adsorción de los aniones cianurados de oro y plata sobre carbonos activados obtenidos a partir de carbón mineral y cáscara de coco. Los resultados indicaron que la efectividad de la adsorción está relacionada con el volumen total de poros disponibles. Se observó que tratamientos como el uso de ácido nítrico perjudicaron la adsorción del oro. Un hallazgo notable fue que, en presencia de un exceso de cianuro libre, la

adsorción de plata fue inhibida, mientras que la de oro no mostró un efecto significativo.

Por su parte, Tsolele et al. (2019) investigaron la utilización de carbón activado obtenido de cáscaras de nuez de macadamia, que fue activado mediante vapor y posteriormente alterado químicamente con ácido nítrico o ácido fosfórico. Se evidenció que tales modificaciones impactan de manera significativa la configuración de los poros, la superficie específica y la concentración de grupos funcionales, lo que afecta de forma directa la eficiencia de adsorción.

Otras investigaciones exploraron la viabilidad de reemplazar los carbones convencionales con opciones alternas provenientes de lo vegetal, tales como la cáscara de coco, el bagazo de caña y la cáscara de arroz, demostrando resultados alentadores en rendimiento y sostenibilidad (Jamilu et al., 2020; Kabir et al., 2022). Los estudios de Jamilu et al. y Kabir et al. han evidenciado que, a través de métodos de activación física o química, se pueden producir carbones con una estructura porosa y un área superficial que se asemejan a los productos industriales, todo ello a costos considerablemente más bajos en comparación con el carbón activado comercial producido a partir de fuentes convencionales.

Por su parte, la dinámica del proceso de adsorción ha sido analizada desde múltiples perspectivas teóricas, tales como los modelos de pseudo-primer y pseudo-segundo orden, así como el modelo de difusión en el interior de las partículas (Revellame et al., 2020; Tawfik y Eltabey, 2024). Estos enfoques son útiles para entender los mecanismos que rigen la interacción entre el oro y la superficie del material adsorbente. A través de estos modelos, es posible obtener una mayor comprensión de los fenómenos físicos y químicos que influyen en la tasa de adsorción y también realizar una comparación de la eficacia de diferentes materiales en condiciones controladas.

En el ámbito nacional, si se han realizado estudios sobre la síntesis y aplicación de carbones activados a partir de biomasa (cáscara de coco, bagazo, cuesco/palmiste, entre otros). Por

ejemplo, Jaramillo (2021) analizó la adsorción del oro en soluciones cianuradas usando distintos tipos de carbones (incluyendo cáscara de coco). Otros estudios describen la producción, activación (física y química) y caracterización (área superficial, porosidad) de carbones a partir de cáscara de coco y otras biomasas locales, en donde justifican la viabilidad técnica de producir carbones aptos para adsorción (Serrano y Novillo, 2019; Amaya y Bacilio, 2021). Por otro lado, existen antecedentes nacionales que analizan sistemas de adsorción/desorción y procesos de recuperación (por ejemplo, análisis de plantas y procesos en El Oro) y trabajos sobre tratamientos/oxidación de oro (Tomalá, 1998; Feijoo, 2020)

Sin embargo, a pesar de la literatura citada aún persiste una falta de estudios en el ámbito nacional que analicen comparativamente los carbones de uso industrial y los de producción artesanal en relación con la adsorción de oro. Este estudio tuvo como objetivo aportar a este campo al examinar un carbón activado derivado de cáscara de coco, comparando su eficacia con la de materiales industriales y evaluando cómo diferentes concentraciones de cianuro impactan la cinética de adsorción.

1.2. Planteamiento del problema

La extracción de oro a través de métodos de adsorción en soluciones que contienen cianuro es una práctica común en el sector de la minería. El carbón activado se destaca como una alternativa efectiva y rentable para aislar el metal valioso. No obstante, elementos como la cantidad de cianuro presente en la solución y el tipo de carbón activado utilizado pueden tener un impacto considerable en la efectividad del procedimiento, afectando tanto la rapidez como la habilidad de adsorción.

En la actualidad, existen varios tipos de carbón activado empleados en la industria, cada uno con propiedades fisicoquímicas que condicionan su desempeño en la recuperación del oro. Entre las más representativas se destacan el área superficial específica, la

distribución y el volumen de poros (micro y mesoporos), la dureza y la densidad aparente, así como la presencia de grupos funcionales en la superficie, factores que determinan tanto la capacidad como la velocidad de adsorción. Sin embargo, el alto costo de los carbones activados, puede ser un obstáculo para las operaciones de menor escala o para las áreas mineras que buscan opciones más sostenibles y asequibles. En esta lógica, se planteó la necesidad de investigar alternativas para producir carbón activado utilizando materias orgánicas de bajo costo, como la cáscara de coco, que es fácilmente accesible en diversas localidades. A su vez, es importante analizar si la efectividad en la adsorción está más influenciada por las características del carbón activado o por las condiciones químicas de la solución, es decir por la concentración de cianuro.

1.3. Justificación

La eficiente recuperación de oro de soluciones cianuradas es un factor clave para la viabilidad y la rentabilidad en el sector minero, especialmente para operaciones de pequeña y mediana escala. Históricamente, se ha utilizado el carbón activado industrial como el principal adsorbente, gracias a su notable capacidad para captar complejos de oro-cianuro. No obstante, su alto precio y la dependencia de proveedores especializados restringen su disponibilidad para algunas áreas de producción. Por ello, es esencial investigar opciones viables, sostenibles y económicas, como la producción de carbón activado a partir de residuos agroindustriales, como lo son las cáscaras de coco.

En este estudio se integró dos perspectivas complementarias: la valoración de la cinética de adsorción de oro en relación con la dosis de cianuro, y el análisis comparativo entre cuatro tipos de carbones activados: uno elaborado a partir de cáscara de coco en laboratorio, y tres carbones industriales importados de uso frecuente en la minería. Con ello, la intención fue proporcionar datos científicos que ayuden a mejorar los parámetros operativos del proceso de adsorción, aumentar la eficacia en la recuperación de metales

valiosos y fomentar la utilización de materiales alternativas y sostenibles en la industria minera.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Evaluar la cinética de adsorción de oro en soluciones cianuradas utilizando carbón activado de origen vegetal (cáscara de coco) en comparación con tres carbones industriales importados, considerando la influencia de las propiedades fisicoquímicas del material y de la concentración de cianuro.

1.4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas del carbón activado derivado de la cáscara de coco y compararlas con tres carbones activados industriales importados considerando parámetros como área superficial, volumen, distribución de poros, dureza, densidad aparente y grupos funcionales superficiales.
- Analizar el efecto de diferentes concentraciones de cianuro en la solución sobre la eficiencia y velocidad de adsorción de oro mediante la aplicación de modelos cinéticos de pseudo-primer orden, pseudo-segundo orden y difusión intraparticular.
- Comparar el desempeño cinético y la capacidad de adsorción del carbón activado de cáscara de coco frente a tres carbones industriales para la determinación de la viabilidad técnica de uso en procesos de recuperación de oro a menor costo.

1.4.3. Planteamiento de la hipótesis

Hipótesis general

Los carbones activados obtenidos a partir de cáscara de coco sometido a diferentes métodos de activación química (ácido fosfórico y ácido sulfúrico en distintas

concentraciones), presenta un desempeño cinético y una capacidad de adsorción de oro en soluciones cianuradas que puede igualar o superar al de un carbón activado industrial de referencia. Dicho desempeño está influenciado por las propiedades fisicoquímicas resultantes del tipo de activación aplicada y por la concentración de cianuro en la solución.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Generalidad de la adsorción

La adsorción se define como un mecanismo fisicoquímico que permite que átomos, iones o moléculas en una fase líquida o gaseosa se adhieran a la superficie de un sólido, el cual se conoce como adsorbente. Este proceso puede ocurrir principalmente a través de fuerzas físicas, lo que se denomina adsorción física, o por interacciones químicas, conocido como adsorción química (Mahmood et al., 2021). Este fenómeno es de gran utilidad en las operaciones de separación y purificación. En el ámbito de la minería, especialmente en la obtención de metales preciosos como el oro, la adsorción es fundamental para la recuperación del metal que se encuentra disuelto en soluciones lixiviadas, en particular aquellas que incluyen cianuro como agente de lixiviación (Chen et al., 2021). Acorde a Raninga et al. (2023) el carbón activado, debido a su alta porosidad, extensa área superficial y capacidad de selectividad, se ha establecido como el adsorbente más comúnmente empleado en este proceso.

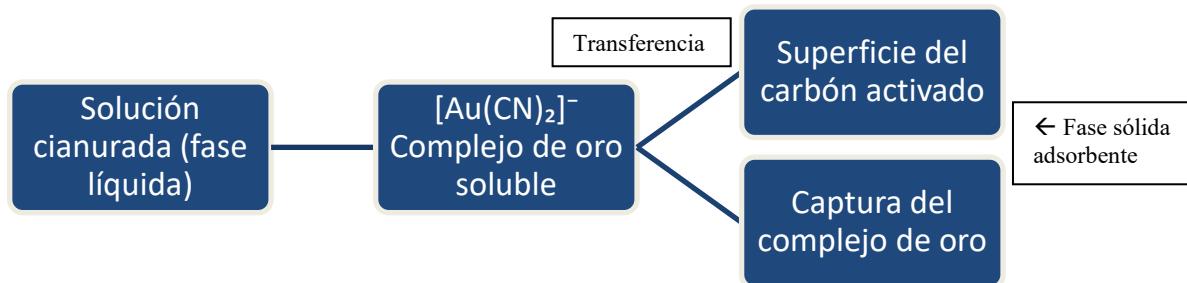
La efectividad de la adsorción de oro se ve influenciada por múltiples factores, tales como la composición del carbón activado, su procedencia y el método de preparación, así como las condiciones químicas del medio, incluyendo la concentración de cianuro libre y el pH (Xia et al., 2022). En este sentido, es fundamental analizar la cinética de la adsorción, es decir, la rapidez con la que el oro se incorpora al carbón activado. Esta evaluación es importante para poder comparar la eficacia de diferentes variedades de carbón, incluso aquellos derivados de biomasa como la cáscara de coco, en comparación con carbonos industriales convencionales. Además, permite comprender cómo varía la adsorción en función de las propiedades del adsorbente y la estructura de la solución cianurada,

proporcionando oportunidades para mejorar los procesos metalúrgicos, disminuir costos operativos y explorar opciones sostenibles en el tratamiento de soluciones que contengan oro (Xia et al., 2022).

2.2. Reacciones heterogéneas

Las reacciones heterogéneas se caracterizan por la interacción de reactivos y productos que se encuentran en distintas fases, habitualmente estableciendo una interfase entre sólido y líquido o entre sólido y gas (Li et al., 2021). En el ámbito de la adsorción de metales preciosos, como el oro, estas reacciones tienen lugar entre una solución cianurada en agua, donde el oro se presenta como complejos solubles, y la superficie del sólido que actúa como adsorbente suele ser carbón activado (Kong et al., 2022). Este tipo de reacción es fundamental en los procesos de extracción de oro, ya que consiste en el traslado del ion metálico desde la fase líquida hacia la superficie del sólido, donde se lleva a cabo la captura del complejo que contiene oro.

Figura 1. Esquema conceptual de la reacción heterogénea en las adsorciones de oro sobre carbón activado en soluciones cianuradas.



Fuente: (Ibragimova et al., 2014)

La adsorción del complejo $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ en carbón activado representa un proceso heterogéneo que está influenciado no solo por la atracción química entre el oro y el material adsorbente, sino también por otros elementos tales como la difusión en la capa externa, la

estructura porosa del carbón y la existencia de diferentes compuestos químicos en la solución que pueden competir por los sitios disponibles (Shahrivar y Gharabaghi, 2020; Xia et al., 2022) . Gautam et al. (2024) recalcan que, al comparar diversos carbones activados, tanto industriales como uno derivado de cáscara de coco, se puede analizar el impacto de estas variables sobre la velocidad y efectividad del proceso. Además, comprender la cinética de estas reacciones heterogéneas es fundamental para mejorar la adsorción y elegir el material más apropiado en función de las condiciones de operación, lo que a su vez facilita una recuperación más eficiente y sostenible del oro.

2.3. Carbonización

La carbonización representa un proceso clave en el método de producción de carbón activado, donde un material orgánico, como la biomasa, es expuesto a elevadas temperaturas en un entorno controlado, que generalmente carece de oxígeno o tiene cantidades mínimas (Reza et al., 2020). Este método permite la eliminación de compuestos volátiles, resultando en un residuo sólido con un alto grado de carbono. A través de este proceso, subproductos agrícolas como la cáscara de coco se convierten en estructuras carbonosas porosas, ideales como materiales base para el carbón activado. La elección de utilizar cáscara de coco como materia prima se basa en su abundancia, costo accesible y su contenido natural de lignina y celulosa, compuestos que promueven el desarrollo de una red porosa muy elaborada durante la carbonización (Ajien et al., 2023).

Ashok et al. (2023) mencionan que la carbonización es una fase importante en la producción del adsorbente derivado de plantas, ya que permite la obtención de un material que puede competir, en términos de capacidad de adsorción, con los carbones activados comerciales. Las características fisicoquímicas del carbón obtenido, tales como el área superficial, el volumen de poros y la distribución del tamaño de poros, están estrechamente ligadas a las condiciones de carbonización, tales como la temperatura, el tiempo y la

atmósfera utilizada, lo que influye de manera significativa en la cinética de adsorción del complejo de oro en soluciones de cianuro (Keboletse et al., 2021; Li et al., 2023).

2.4. Activación del carbón

La activación del carbón se refiere a la fase que sigue a la carbonización, diseñada para desarrollar y mejorar la estructura porosa del material carbonoso, lo que aumenta tanto su superficie como su capacidad de adsorción (Zhou et al., 2021). Este proceso puede realizarse mediante métodos físicos o químicos. En el caso de la activación física, el carbón que ya ha sido carbonizado se expone a temperaturas elevadas junto con agentes oxidantes como el vapor de agua o el dióxido de carbono (Ndido et al., 2020). Por otro lado, la activación química utiliza agentes deshidratantes u oxidantes, como el ácido fosfórico o el hidróxido de potasio, antes del proceso de carbonización, lo que favorece la creación de poros durante el calentamiento (Heidarinejad et al., 2020).

La activación del carbón derivado de cáscaras de coco es fundamental para desarrollar un adsorbente que compita efectivamente con los carbones activados que se encuentran en el mercado (Ajien et al., 2023). Xia et al. (2021) mencionan que la formación de una estructura micro porosa durante el proceso de activación tiene un impacto directo en la habilidad del carbón para captar complejos de oro presentes en soluciones de cianuro. Así, un control minucioso de las condiciones de activación es esencial para mejorar la cinética de adsorción.

2.5. Soluciones de oro cianurado

Las soluciones de cianuro con oro se generan a través de un proceso hidrometalúrgico comúnmente empleado en la minería para extraer oro de minerales que lo contienen (Neag et al., 2021). Este enfoque se fundamenta en la fuerte atracción del oro hacia el ion cianuro (CN^-), lo que lleva a la formación de complejos solubles, como el

dicianoaurato (I), $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$, al combinarse con oxígeno en un entorno alcalino. La solubilidad y estabilidad de estos complejos permiten que el oro se transforme de su estado sólido a líquido, facilitando su posterior recuperación mediante métodos como la adsorción mediante carbón activado.

Las soluciones de cianuro con oro son el medio a través del cual se examina la cinética de adsorción del oro mediante diversos tipos de carbón activado (Martínez-Mendoza et al., 2020). Este análisis se centra en estudiar cómo las velocidades de adsorción cambian al ajustar la concentración de cianuro en la solución. Se considera que concentraciones más elevadas de cianuro pueden afectar la estabilidad del complejo de oro y, en consecuencia, su interacción con la superficie del adsorbente (Xia et al., 2021, 2022). Este estudio es fundamental para evaluar el rendimiento de los carbones activados industriales en comparación con el carbón derivado de cáscara de coco, lo que facilita la identificación de opciones sostenibles y efectivas para la recuperación de oro en aplicaciones industriales.

2.6. Carbón activado

El carbón activado es un material con porosidad significativa y excelentes propiedades de adsorción, comúnmente empleado en actividades de separación, purificación y extracción de metales, incluyendo el oro (Reza et al., 2020). Su efectividad se debe a su amplia superficie, su estructura micro porosa y la existencia de grupos funcionales en su superficie que favorecen la reacción con distintos compuestos químicos. En el sector minero, el carbón activado juega un papel fundamental en procesos como la adsorción del complejo $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ de soluciones que contienen cianuro, facilitando así una recuperación eficiente del metal precioso (Xia et al., 2022).

El carbón activado desempeña una función clave como adsorbente para estudiar la

dinámica de adsorción del oro en soluciones de cianuro con distintas concentraciones de esta sustancia (Martínez-Mendoza et al., 2020). Se emplean tanto carbones industriales de uso común como un carbón activado producido a partir de cáscaras de coco, con el objetivo de evaluar su rendimiento. Este método no solo intenta discernir cuál de los materiales proporciona tasas de adsorción superiores, sino que también busca examinar la viabilidad de utilizar residuos de biomasa como una opción sostenible. El análisis comparativo de los diversos tipos de carbón permite determinar su eficacia, lo cual resulta fundamental para mejorar los procesos de extracción de oro, minimizando así el impacto ambiental y reduciendo los costos operativos.

2.7. Carbón de cáscara de coco

La cáscara de coco se considera un subproducto agrícola rico en carbono, lo que la hace perfecta como materia prima para la fabricación de carbón activado. Su composición lignocelulósica facilita la obtención de un material que presenta una notable porosidad y una amplia área superficial, atributos esenciales en los procesos de adsorción (Singh et al., 2024). El aprovechamiento de este residuo agroindustrial fomenta una práctica sostenible, ya que contribuye a transformar desechos orgánicos en aplicaciones con un alto valor añadido, como la extracción de metales preciosos.

El carbón activado derivado de la cáscara de coco es muy valorado por su calidad superior, gracias a su estructura micro porosa y su fortaleza mecánica. Este tipo de carbón exhibe una notable capacidad para adsorber una variedad extensa de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos, lo que lo convierte en un recurso útil en múltiples áreas, incluyendo la purificación del agua, tratamiento de gases, así como en el sector farmacéutico y alimentario (Al-sareji et al., 2023; Devi et al., 2023; Packialakshmi et al., 2021; Sujiono et al., 2022). Adicionalmente, su reducido contenido de cenizas y su estabilidad ante el calor lo distinguen de otros carbones activados que se obtienen de materiales como la madera o el

carbón mineral. La abundancia global de cáscara de coco, junto con su bajo costo, la posiciona como una alternativa tanto económica como ecológica para la fabricación de adsorbentes de alto rendimiento.

2.8. Características del oro

El oro es un metal de transición altamente estimado, apreciado por su valor físico, químico y económico. Este metal es bien conocido por su notable resistencia química, lo que lo torna inmune a la corrosión y a la oxidación en condiciones normales del entorno. Su excelente capacidad de conducción tanto del calor como de la electricidad, junto con su maleabilidad y ductilidad, permiten que se procese en finas láminas o en hilos sin comprometer su integridad estructural (Corti y Holliday, 2004). En el campo de la metalurgia, el oro se puede encontrar bien en su forma nativa o en asociación con minerales sulfurados como la pirita y la arsenopirita, lo que influye en los métodos utilizados para su extracción y procesamiento. Su afinidad con compuestos complejantes como el cianuro y la tiourea ha facilitado la creación de tecnologías de recuperación específicas (Cook et al., 2013)

2.9. Conceptualización del cianuro

El cianuro se define como un químico que contiene el grupo funcional CN^- , que consiste en un átomo de carbono unido a un átomo de nitrógeno mediante un triple enlace. Este compuesto puede presentarse en forma de sales, tales como el cianuro de sodio (NaCN) o el cianuro de potasio (KCN), y se encuentra también en soluciones acuosas formando el ion cianuro libre (CN^-) (Schulz y Surkau, 2023). Estos compuestos son muy reactivos y tienen diversas aplicaciones industriales, especialmente en la metalurgia, donde se utilizan en la extracción de oro y plata, gracias a su capacidad de crear complejos estables y solubles con dichos metales. Sin embargo, es importante destacar que el cianuro es una sustancia altamente tóxica, capaz de interferir con funciones biológicas vitales como la respiración

celular, por lo que se requiere la implementación de estrictas medidas de seguridad y control ambiental en su manipulación (Isom y Borowitz, 2016).

2.10. Proceso de cianuración usado

Desde finales del siglo XIX, la cianuración se ha consolidado como uno de los métodos más empleados en la minería, debido a su eficiencia para extraer oro incluso de minerales con bajo contenido. Este procedimiento se lleva a cabo en un medio alcalino cuidadosamente controlado, con el objetivo de evitar la formación de cianuro de hidrógeno, un gas sumamente tóxico (Manila y Devi, 2021). Según Mbayo et al. (2019) la elección de la modalidad de cianuración depende de las características del mineral y de la operación minera, pudiendo llevarse a cabo mediante lixiviación en pilas, en tanques agitados o en bateas. La extracción del oro generalmente se logra a través de adsorción en carbón activado o mediante métodos de precipitación química. A pesar de ser una técnica que resulta económica y eficiente, su implementación exige rigurosos controles ambientales y de seguridad para reducir al mínimo los efectos adversos en los ecosistemas circundantes.

Por otro lado, la cianuración es un método de hidrometalurgia frecuentemente empleado en la minería para extraer metales preciosos, principalmente oro y plata, de los minerales (Medina y Anderson, 2020). Esta técnica se basa en la habilidad del cianuro para unirse a estos metales y formar compuestos solubles, lo que permite su separación de los minerales no valiosos. El proceso general consiste en triturar el mineral, disolverlo en una mezcla diluida de cianuro de sodio o potasio, y luego recuperar el metal utilizando métodos como la precipitación con zinc mediante el proceso Merrill-Crowe, o a través de la adsorción en carbón activado, conocidos como CIP o CIL (Ilyas et al., 2021). Aunque es un procedimiento efectivo, el uso de cianuro ha suscitado inquietudes sobre su impacto en el medio ambiente y la salud debido a su elevada toxicidad, lo que ha llevado a la exploración de tecnologías alternativas más ecológicas.

2.11. Factores que afectan la lixiviación

La efectividad del proceso de extracción de oro mediante lixiviación está condicionada por una serie de factores que influyen en la disolución y eventual recuperación del metal. Entre los aspectos más significativos se halla la granulometría del mineral, dado que una mayor área de contacto se potencia la acción del agente lixiviante (Costa et al., 2022). También son clave la concentración de cianuro y el oxígeno disuelto, ya que son necesarios para que se formen complejos solubles de oro (Johnson, 2015). Además, el pH de la solución debe mantenerse en un nivel alcalino para prevenir la liberación del cianuro en forma de gas tóxico (Botz et al., 2005). Otros elementos como la temperatura, el tiempo de interacción entre la solución y el mineral, y la existencia de impurezas o minerales que consumen cianuro, como los sulfuros o los compuestos de cobre, afectan de manera directa la tasa de disolución y la recuperación final del metal (Xie et al., 2013).

2.12. Tipos de carbón activado, estructura, elaboración y factores que afectan su funcionalidad

La clasificación del carbón activado se realiza principalmente en función de su origen y el proceso de activación utilizado: el carbón activado de origen vegetal se elabora a partir de cáscaras de coco, residuos de caña, huesos o diversos tipos de madera, mientras que el de origen mineral se deriva del carbón bituminoso o de la antracita (Gupta, 2018). Ambos tipos pueden ser activados de dos maneras: físicamente, a través de vapor o dióxido de carbono bajo condiciones de alta temperatura, o químicamente, utilizando sustancias como ácido fosfórico o hidróxido de potasio. Este proceso da lugar a una estructura con altas características de porosidad, que incluye microporos y mesoporos. La eficacia del carbón depende de diferentes parámetros, tales como el área superficial específica, la forma y cantidad de poros, la densidad y la dureza del material, así como la existencia de grupos

funcionales en la superficie que promueven la interacción química con los disolventes (Chmiola et al., 2006).

2.13. Índices metalúrgicos

Los índices metalúrgicos son medidas cuantitativas que facilitan la evaluación y proyección del comportamiento de los minerales en los procesos de extracción y beneficio metalúrgico. Estos parámetros son fundamentales para comprender aspectos clave como la reactividad, facilidad de tratamiento y efectividad con la que un mineral puede liberar los metales preciosos que contiene (Iftekhar et al., 2022). En la aplicación práctica, estos índices son herramientas valiosas para el diseño y la optimización de procedimientos como la trituración, molienda, lixiviación y recuperación, lo que permite determinar las mejores condiciones operativas y disminuir los costos. Resultan esenciales para la comparación entre diferentes minerales o depósitos, así como para prever posibles contratiempos en la planta de procesamiento (Aasly, 2024).

Entre los parámetros metalúrgicos más habituales se incluyen la resistencia del mineral, el potencial de separación de partículas, la velocidad de extracción mediante lixiviación, y la adsorción en productos como los carbones activados (Kursunoglu y Demir, 2022; Odebiyi et al., 2021).

En el presente estudio la capacidad de adsorción en equilibrio (q_e) se calcula a partir de la diferencia entre la concentración inicial y la de equilibrio del oro en solución.

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m}$$

Donde,

q_e es la cantidad de soluto (por ejemplo, iones de oro) adsorbido por unidad de masa de adsorbente en el equilibrio (mg/g).

C_o es la concentración inicial de soluto en la solución antes de la adsorción (mg/l)

C_e es la concentración del soluto en la solución cuando se alcanza el equilibrio (mg/l)

V es el volumen de solución en contacto con el adsorbente (l)

m es la masa de adsorbente (carbón activado de cáscara de coco) utilizada en el ensayo (g).

La eficiencia de adsorción (%E) se calcula con la expresión:

$$\%E = \frac{(C_o - C_t)}{C_o} \times 100$$

Donde,

C_t corresponde a la concentración de oro en un tiempo determinado t

Por otra parte, la eficiencia de remoción (% R) se expresa en porcentaje, como sigue:

$$\% R = \frac{(C_o - C_e)}{C_o} \times 100$$

Para analizar la cinética se aplican los modelos de pseudo-primer orden, pseudo segundo orden y difusión intrapartícula, con el fin de determinar los mecanismos que gobiernan la adsorción.

El modelo de primer orden asume que la velocidad de adsorción es proporcional a la diferencia entre la cantidad adsorbida en el equilibrio y la cantidad adsorbida en el tiempo t .

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t$$

Donde,

q_t es la cantidad de oro adsorbido en el tiempo t (mg/g)

q_e es la cantidad de oro adsorbido en equilibrio (mg/g)

k_t es la cantidad de velocidad de adsorción de primer orden (1/min)

t es el tiempo de contacto (min)

Por otra parte, el modelo del pseudo-segundo orden supone que la cinética de adsorción está controlada por interacciones químicas (quimiosorción) entre el adsorbato y los sitios activos del adsorbente.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

k_2 es la constante de velocidad de adsorción de segundo orden (g/mg*min)

El modelo de difusión intrapartícula (Weber-Morris) se calcula de la siguiente manera:

$$q_t = k_{id} \times t^{1/2} + C$$

donde k_{id} (mg·g⁻¹·min^{-1/2}) representa la constante de difusión y C el espesor de la capa límite

En la presente investigación se decidió aplicar tres modelos cinéticos —pseudo-primer orden, pseudo-segundo orden y difusión intrapartícula, ya que los datos de concentración de oro en función del tiempo (C_t vs. t) que forman parte del diseño experimental permiten describir y comparar los mecanismos y velocidades de adsorción entre los diferentes carbones activados. De manera complementaria, se reportarán índices metalúrgicos fundamentales, como la recuperación de oro (R), la carga en el carbón y el coeficiente de distribución (K_d), que constituyen parámetros clave para la evaluación de la eficiencia del proceso. No se emplearán otros índices metalúrgicos que requieren información proveniente de balances de planta o de pruebas a gran escala, dado que los ensayos de laboratorio no generan ese tipo de datos, salvo que en etapas posteriores se realicen muestreos adicionales. Los datos necesarios se obtendrán a partir de las concentraciones medidas en solución por de absorción atómica en tiempos controlados y, en el caso del oro espectrometría retenido en el carbón, mediante digestión ácida del sólido cargado y su

posterior análisis por AAS o ICP, lo que garantiza la trazabilidad de los resultados y la solidez de las comparaciones.

En este estudio, la eficiencia del carbón activado se cuantifica mediante una combinación de métricas cinéticas y índices metalúrgicos. A partir de las concentraciones de oro en solución (C_0 , C_t , C_e) determinadas por espectrometría de absorción atómica, y de los valores de V y m se calcularán q_t , q_e y $\%E$, y se ajustarán los modelos de pseudo-primer orden, pseudo-segundo orden y difusión intrapartícula, seleccionando el modelo predominante según R^2 . Adicionalmente, se estimarán la recuperación por adsorción R , la carga en carbón (q_e) y el coeficiente de distribución $K_d = q_e/C_e$. El tenor de oro en el carbón cargado se obtendrá por digestión ácida y análisis AAS/ICP.

2.14. Modelos cinéticos de adsorción

El enfoque de pseudo-primer orden sugerido por Lagergren establece que la tasa de adsorción está relacionada con la variación entre la capacidad de adsorción en equilibrio (q_e) y la capacidad en un momento t (q_t). Su forma diferencial se expresa como:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t)$$

Cuyo ajuste lineal se obtiene al integrar la ecuación:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

Donde, k_1 (min^{-1}) es la constante cinética de pseudo-primer orden.

A partir de la pendiente y la ordenada al origen de la recta se determinaron los parámetros cinéticos y la capacidad de adsorción teórica, que posteriormente se compararon con los valores experimentales.

El modelo de pseudo-segundo orden, desarrollado por Ho y McKay, supone que la

velocidad de adsorción depende del cuadrado de la diferencia entre q_e y q_t . Su ecuación diferencial es:

$$\frac{dq_t}{dt} - k_2(q_e - q_t)^2$$

Donde, k_2 ($\text{g mg}^{-1} \text{ min}^{-1}$) es la constante de velocidad de pseudo-segundo orden.

Adicionalmente, se consideró el modelo de difusión intrapartícula de Weber-Morris, que evalúa la posible limitación por transporte interno en los poros del adsorbente. Su expresión lineal:

$$q_t - k_{id}t^{\frac{1}{2}} + C$$

Donde, k_{id} ($\text{mg g}^{-1} \text{ min}^{-1/2}$) corresponde a la constante de difusión intraparticula y C representa el espesor de la capa límite. Si la recta obtenida al graficar q_t frente a $t^{1/2}$ pasa por el origen, se asume que la difusión intraparticula es el único mecanismo limitante; en caso contrario, intervienen simultáneamente fenómenos de superficie y transporte en la película externa.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE LABORATORIO

3.1. Tipo de investigación

Esta investigación se clasifica como un estudio experimental, comparativo y de laboratorio, ya que se dedica a examinar el proceso de adsorción de oro en soluciones de cianuro bajo condiciones controladas. Este enfoque permite la manipulación directa de variables independientes, tales como la concentración de cianuro y el tipo de carbón activado utilizado, para explorar cómo las mismas influyen en la eficacia y la rapidez del proceso de adsorción.

El estudio se consideró comparativo porque evaluó el rendimiento de un carbón activado de naturaleza vegetal, producido a partir de cáscaras de coco, en comparación con carbones activados industriales, con el objetivo de analizar su viabilidad tanto técnica como económica. Gracias a este diseño, se pudieron detectar las diferencias y similitudes en las características fisicoquímicas de los materiales y su comportamiento cinético bajo diversas condiciones operativas.

Se optó por un enfoque experimental debido a la necesidad de simular en el laboratorio las condiciones que caracterizan a la adsorción de oro, lo que permitió un control minucioso de factores como el tiempo de contacto, temperatura, agitación y concentración de reactivos. Este tipo de metodología favoreció la recolección de datos cuantitativos fiables que fueron posteriormente analizados a través de modelos cinéticos reconocidos, estableciendo una base sólida para valorar la eficacia de los carbones activos y sugerir métodos sostenibles para la recuperación de oro.

3.2. Población y muestra de estudio

La presente investigación, que se desarrolló en un entorno experimental de laboratorio, se dedicó a examinar los carbones activados que se emplearon en la adsorción de oro en soluciones que contenían cianuro. La "muestra" del análisis estuvo compuesta por diversas variedades de carbón activado que son relevantes para el proceso de extracción de oro, incluyendo productos de fabricación industrial, así como opciones artesanales. Se eligieron específicamente dos tipos de carbones activados para el estudio:

- Uno es el carbón activado derivado de cáscara de coco, que se produjo a través de un procedimiento de carbonización y activación controlada en el laboratorio, lo que permitió analizar la viabilidad de una aproximación sostenible y económica.
- El otro grupo incluyó carbones activados de origen industrial, que sirvieron como estándar para comparar su capacidad de adsorción y comportamientos cinéticos.

Con el fin de asegurar que los resultados fueran reproducibles y confiables, cada experimento se llevó a cabo en tres ocasiones, variando factores como la concentración de cianuro y el periodo de contacto. Este enfoque metodológico garantizó la consistencia de los datos y facilitó la realización de análisis estadísticos adecuados para evaluar el rendimiento de los diferentes tipos de carbón activado.

3.3. Materiales y reactivos

Para llevar a cabo los ensayos experimentales, se utilizaron materiales de laboratorio, así como reactivos químicos que fueron esenciales para asegurar la exactitud y la fiabilidad de los resultados en la investigación. En la lista de materiales de laboratorio se utilizaron:

- Tubos de ensayo
- Matraces con graduación

- Pipetas (graduadas como automáticas)
- Agitadores magnéticos con regulación de velocidad
- Balanzas analíticas con una precisión de $\pm 0,0001$ g,
- Buretas
- Vasos de precipitación
- pHmetro debidamente calibrado
- Agitadores orbitales
- Espectrofotómetro de absorción atómica para medir la concentración de oro en las disoluciones.

Todos los instrumentos se manejaron conforme a las directrices de operación y calibración proporcionadas por los fabricantes para asegurar lecturas exactas.

En lo que respecta a los reactivos químicos, se utilizaron soluciones de cianuro de sodio (NaCN) de calidad analítica, soluciones de oro trivalente (Au^{3+}) de alta pureza, así como agua desionizada para elaborar todas las soluciones experimentales. Los reactivos fueron comprados a proveedores acreditados y se aplicaron en concentraciones y condiciones controladas, garantizando así la seguridad y la repetibilidad de los ensayos.

3.4. Síntesis y preparación del carbón activado de cáscara de coco

En esta investigación se emplearon un total de cuatro variedades de carbón activado. Una de estas fue elaborada en el laboratorio a partir de cáscaras de coco a través de un método de activación química; el del ácido fosfórico (H_3PO_4 al 40% p/v). Los otros tres tipos eran carbones activados industriales importados, que se utilizan comúnmente en la recuperación de oro en plantas de procesamiento bajo los enfoques CIP y CIL. Esta elección facilitó el acceso a materiales con diferentes orígenes y tratamientos, permitiendo realizar una comparación

efectiva entre el rendimiento de los carbones de origen vegetal y los comerciales.

El carbón activado que se empleó en esta investigación fue derivado de cáscara de coco, obteniéndose a través de un método cuidadosamente regulado que abarcó las fases de secado, carbonización, activación, molienda y caracterización inicial, con el propósito de producir un material adsorbente con características fisicoquímicas óptimas para la extracción de oro de soluciones cianuradas (Anexo 1).

Primero, la cáscara de coco fue tratada con un secado a temperatura controlada (105°C durante 24 h) para disminuir su humedad, facilitando así el siguiente paso de carbonización. Tras lograr un estado seco, la biomasa fue carbonizada a 500°C durante 2 horas, con el que se pretendía convertir la materia orgánica en carbón y formar una estructura porosa inicial.

Después, el carbón obtenido fue sometido a un procedimiento de activación que comprendió tanto técnicas físicas como químicas. La activación química fue por tratamiento por vapor a alta temperatura (800°C) durante 1 hora, con el fin de incrementar el desarrollo de microporos. En la activación química, se realizó el carbón activado con ácido fosfórico (40% p/v) en donde la cáscara carbonizada fue impregnada con la solución durante 12 horas, manteniendo un pH controlado y una relación ácido: biomasa de 1:1.

Finalmente, el carbón fue molido, tamizado a una granulometría de 250-500 μm y sometido a una caracterización inicial (área superficial por método BET, distribución de poros y densidad aparente. El método BET (Brunauer–Emmett–Teller) es un método de análisis fisicoquímico que posibilita la evaluación del área superficial específica de un sólido mediante la adsorción de gases inertes, generalmente nitrógeno, a temperaturas bajas. Este enfoque se fundamenta en cuantificar el volumen de gas que se adhiere a la superficie del material y en sus microporos, adaptando los datos obtenidos a la ecuación BET, que explica la acumulación de múltiples capas de moléculas adsorbidas.

También se examinó la existencia de grupos funcionales superficiales a través de espectroscopía *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) que traducido al español significa Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier. Este análisis facilitó la realización de comparaciones preliminares entre el carbón derivado de cáscara de coco y los carbones utilizados en la industria, entregando datos valiosos sobre su capacidad como adsorbente en procesos de extracción de oro.

3.5. Preparación de soluciones cianuradas de oro

Para llevar a cabo los ensayos de adsorción, se elaboraron soluciones de oro cianurado con concentraciones específicas de cianuro, seleccionadas para analizar cómo este factor afectó la eficiencia y la velocidad de adsorción. Las concentraciones examinadas durante la investigación fueron 50 mg/l, 100 mg/l y 150 mg/l, abarcando un intervalo que permitió identificar cambios significativos en la cinética del proceso y en la capacidad de adsorción de los diferentes carbones activados.

La elaboración de las soluciones implicó disolver oro en su estado trivalente (Au^{3+}) junto con NaCN hasta lograr las concentraciones deseadas. Además, se monitorizó el pH de la solución, generalmente ajustándolo a niveles alcalinos en torno a 10, una condición que favoreció la formación de complejos oro-cianuro estables y optimizó la adsorción en el carbón activado. El pH se modificó utilizando soluciones estándar de hidróxido de sodio o ácido cianhídrico diluido, según se requiriera.

Para elaborar las soluciones cianuradas, se definieron las tres concentraciones antes mencionadas. Estos niveles se calcularon teniendo en cuenta la cantidad de cianuro de sodio (NaCN) necesaria, considerando su pureza comercial del 98%. La proporción de CN^- dentro del NaCN que fue de aproximadamente 0,53 y de este modo, la cantidad de NaCN requerida para cada concentración se estableció de acuerdo con esta relación y el volumen final de la

disolución. Así, para preparar 1 litro de solución, se necesitó cerca de 0,096 g de NaCN para alcanzar 50 mg/l, 0,192 g para 100 mg/l y 0,288 g para 150 mg/l de CN⁻. Alternativamente, al contar con una solución madre de NaCN a 10 g/l, las alícuotas necesarias para obtener las mismas concentraciones fueron de 9,6 ml, 19,2 ml y 28,8 ml, completándose cada caso con agua desionizada hasta alcanzar el volumen deseado.

Durante el proceso de preparación, se comprobó que la proporción molar entre el cianuro y el oro debía ser al menos 5:1, a fin de garantizar que el complejo se formara por completo [Au(CN)₂]⁻. Las soluciones se mantuvieron dentro de un rango de pH de entre 10,5 y 11, ajustándose esta medida con hidróxido de sodio (NaOH), lo cual es esencial para conservar la estabilidad del ion cianuro y prevenir su descomposición. A continuación, se agregó el oro trivalente (Au³⁺) en las concentraciones necesarias, mezclando la solución con agitación continua hasta que se obtuvo la disolución y estabilización total del complejo.

La elaboración de soluciones cianuradas se llevó a cabo en un entorno controlado, siguiendo un protocolo estandarizado. Inicialmente, se midió la cantidad adecuada de cianuro de sodio (NaCN) o se tomó el volumen correspondiente de la solución madre que se había preparado anteriormente, de acuerdo con las concentraciones definidas.

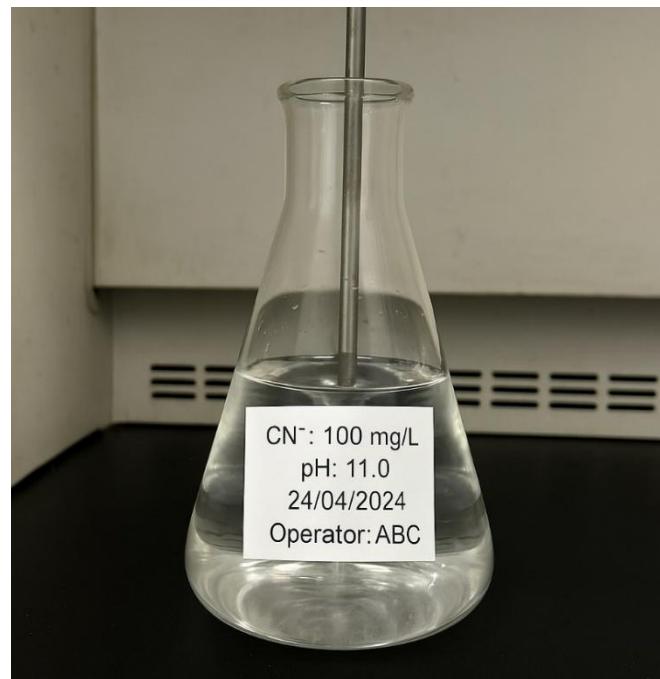
Figura 2. Pesaje de cianuro de sodio ($NaCN$)



Fuente: Elaboración propia

Después, el reactivo se colocó en un matraz aforado y se disolvió en agua desionizada, realizando el proceso bajo una campana de extracción para garantizar una ventilación apropiada y una agitación continua, lo que permitió la disolución completa del compuesto.

Figura 3. Disolución bajo campana (matraz/vaso, etiqueta visible).



Fuente: Elaboración propia

En la siguiente fase, se realizó la medición del pH de la solución con un pHmetro que había sido calibrado previamente. Se ajustó de manera gradual hasta que se logró un pH entre 10,5 y 11, utilizando la adición de hidróxido de sodio (NaOH) en concentraciones de 1 M o 0,1 M, según fuera necesario. Este nivel de pH se mantuvo para asegurar que el ion cianuro permaneciera estable y para evitar la liberación de gases peligrosos.

Figura 4. Ajuste de pH.



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se añadió oro trivalente (Au^{3+}), que se había preparado a partir de un estándar comercial empleado en espectrometría de absorción atómica (AAS), ajustando la concentración inicial deseada con la proporción de dilución. La solución de oro se incorporó lentamente a la solución cianurada que ya había sido ajustada en pH, garantizando así que el complejo $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ se formará completamente.

Figura 5. Preparación de la muestra estándar de Au.



Fuente: Elaboración propia

Para asegurar que la proporción estequiométrica fuera la adecuada, se comprobó que la relación molar entre el cianuro y el oro fuese al menos de 5:1, lo que aseguraba la completa disolución del metal. Tras la incorporación de todos los componentes, la mezcla se mantuvo en agitación suave y se permitió reposar entre 10 y 15 minutos para estabilizar el complejo que se había formado.

Figura 6. Adición de Au a la solución cianurada y homogeneización.



Fuente: Elaboración propia

Al finalizar, cada solución fue etiquetada con la información pertinente, que incluía el número de lote, la concentración de cianuro, la concentración inicial de oro, el pH final, la temperatura, la fecha y hora de preparación, así como el nombre de la persona responsable, garantizando así la trazabilidad del proceso en su totalidad.

Todo el proceso se llevó a cabo en un entorno seguro y regulado. Las actividades se realizaron dentro de una cabina de extracción, utilizando elementos de protección personal (batas, guantes, gafas y mascarillas con filtros para vapores). Se creó un registro minucioso de cada una de las soluciones, especificando la concentración, el pH final, la temperatura y la fecha en la que se prepararon. Finalmente, los desechos fueron neutralizados a través de una oxidación controlada utilizando hipoclorito de sodio o peróxido de hidrógeno, antes de ser desechados de acuerdo con las normativas actuales de bioseguridad.

3.6. Ensayos de adsorción

Se llevaron a cabo experimentos de adsorción con el objetivo de analizar la efectividad y la rapidez de la extracción de oro empleando diversos tipos de carbón activado bajo condiciones controladas. Con este fin, se definieron meticulosamente los parámetros experimentales, lo que garantizó la repetibilidad de los resultados y facilitó una comparación precisa entre el carbón activado derivado de cáscara de coco y el industrial.

Los experimentos se realizaron en un sistema de tipo discontinuo utilizando matraces Erlenmeyer de 250 ml, los cuales contenían 100 ml de una solución de cianuro de oro en concentraciones de 50, 100 y 150 mg/l de CN^- , mientras que la concentración inicial de oro fue ajustada entre 5 y 10 mg/l. Se utilizó una cantidad constante de 1,0 g de carbón activado por cada matraz, lo que resultó en una relación sólido-líquido de 1:100 (g/ml), adecuada para proporcionar un exceso de sitios activos para la adsorción. La temperatura se mantuvo en un rango controlado de 25 ± 2 °C, y se utilizó un agitador magnético a una velocidad de 200 rpm para garantizar un contacto uniforme entre el adsorbente y la solución.

Los experimentos de adsorción fueron elaborados con el objetivo de analizar la efectividad y la rapidez de la extracción de oro mediante diferentes tipos de carbón activado en un entorno de laboratorio controlado. Para alcanzar este objetivo, se establecieron parámetros experimentales meticulosamente determinados, lo cual aseguró que los resultados sean reproducibles y que se pueda realizar un análisis comparativo entre el carbón derivado de cáscaras de coco y los carbones industriales.

La cantidad de carbón activado empleada se modificó de acuerdo con el volumen de la solución cianurada que contenía oro, garantizando así que hubiera una superficie adsorbente en exceso, lo que favoreció el contacto con los iones de oro presentes en la mezcla. Esta relación facilitó el estudio de la capacidad de adsorción del material sin que la disponibilidad de sitios

activos constituyera un factor limitante.

Se llevaron a cabo mediciones del tiempo de interacción entre la solución y el carbón en intervalos regulares, comenzando a partir de los cinco minutos y extendiéndose hasta alcanzar los 180 minutos o hasta que se lograra un estado de equilibrio en la adsorción. Durante los experimentos, se mantuvo la mezcla en constante movimiento utilizando agitadores magnéticos a velocidades específicas, lo que garantizó una distribución uniforme del carbón en la solución, previniendo así la sedimentación de las partículas, sin provocar la descomposición del complejo de oro y cianuro. La temperatura se controló de manera que permaneciera constante, ya sea a temperatura ambiente o a través de un sofisticado sistema de laboratorio, con el propósito de evitar cualquier fluctuación que pudiera interferir en la cinética de la adsorción.

Finalmente, se recogieron las muestras al comienzo del experimento, a lo largo del período de contacto y al concluir, con el fin de medir la cantidad de Au^{3+} que permanecía en la solución. Estas evaluaciones facilitaron el cálculo del porcentaje de adsorción y la evaluación de la eficacia de los carbones en diversas condiciones experimentales, sirviendo como fundamento para el análisis cinético y la comparación entre el carbón obtenido de cáscara de coco y los carbones industriales.

3.7. Determinación de concentración de oro

Previo a la medición con instrumentos, las muestras recolectadas de los experimentos de adsorción pasaron por un proceso de preparación que consistió en filtración o centrifugación para quitar las partículas sólidas en suspensión, como el carbón fino. Cuando fue necesario, se diluyeron en agua desionizada para asegurar que las lecturas estuvieran dentro del rango lineal del método. Durante su manipulación, se conservó un pH alcalino en las muestras con el fin de mantener la estabilidad del complejo de oro y cianuro, evitando así pérdidas por reacciones químicas.

Se elaboró una curva de calibración utilizando soluciones patrón de oro que fueron preparadas con el mismo disolvente o matriz que en las muestras, o mediante el método de adición estándar en caso de que hubiera efectos de matriz. Se sugirió incluir al menos tres niveles de concentración que cubran el rango de trabajo previsto, lo cual debió incluir un blanco instrumental. Cada estándar y muestra fue analizado al menos en dos o tres repeticiones para minimizar la incertidumbre vinculada al experimento.

3.8. Análisis estadístico

Con la finalidad de asegurar la validez y la fiabilidad de los resultados obtenidos, todos los experimentos se llevaron a cabo en tres réplicas independientes. Esto permitió calcular promedios y desviaciones estándar, lo que a su vez ayudó a disminuir el impacto de errores experimentales y a fortalecer la calidad de los datos.

El enfoque del análisis estadístico se centró en evaluar el rendimiento de los diferentes tipos de carbón activado en diversas concentraciones de cianuro. Para ello, se utilizó un análisis de varianza (ANOVA), ya fuera de un solo factor o multifactorial según fuera necesario, con el propósito de identificar si había diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los tratamientos. En aquellos casos donde se hallaron diferencias significativas, se realizaron pruebas post-hoc (Tukey o Duncan) que facilitaron la identificación precisa de los grupos donde se manifestaban tales diferencias.

La evaluación de los datos estadísticos se realizó estableciendo un nivel de significancia de $p < 0,05$, un estándar comúnmente utilizado en investigaciones experimentales. Esta metodología facilitó el análisis del efecto del tipo de carbón activado y la concentración de cianuro en la capacidad y la dinámica de adsorción del oro.

3.9. Procedimiento de seguridad y manejo de residuos

Debido a que los experimentos de adsorción requirieron el uso de cianuro de sodio y

soluciones de oro cianuradas (ambas sustancias altamente peligrosas y tóxicas) se establecieron rigurosos protocolos de seguridad en cada fase del trabajo experimental. La manipulación de los reactivos se llevó a cabo bajo una campana de extracción para prevenir la inhalación de vapores dañinos y asegurar una ventilación adecuada en el espacio de trabajo. Todo el personal del laboratorio utilizó en todo momento el equipo de protección personal correspondiente, que incluía guantes resistentes a productos químicos, gafas de seguridad, bata de laboratorio y, cuando era necesario, una mascarilla con filtros para vapores.

En lo que respecta a la gestión de desechos, se aplicaron protocolos destinados a reducir los riesgos para el medio ambiente y la salud pública. Los residuos cianurados producidos durante las pruebas fueron tratados con un proceso de neutralización química antes de su eliminación, utilizando oxidantes como el hipoclorito de sodio o el peróxido de hidrógeno, buscando transformar el cianuro libre en compuestos menos dañinos. Después de este tratamiento, los desechos fueron conservados en contenedores apropiadamente etiquetados, siguiendo las normativas de bioseguridad y los procedimientos prescritos para el tratamiento de residuos peligrosos.

CAPÍTULO 4

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Introducción

El propósito central de este capítulo es la exposición metódica, el procesamiento estadístico y la interpretación técnica de todos los datos emanados de los ensayos de cinética de adsorción de oro. Dichos experimentos se ejecutaron en el laboratorio bajo condiciones rigurosamente controladas (concentración de cianuro libre, tiempo de contacto y pH), según lo detallado previamente en el Capítulo 3 (Metodología).

El objetivo primordial de este análisis es evaluar y contrastar el comportamiento cinético del carbón activado de origen vegetal (cáscara de coco) frente a tres materiales activados de uso industrial, buscando así certificar la factibilidad técnica y metalúrgica de utilizar este adsorbente alternativo.

La cinética de adsorción constituye un parámetro crucial para el diseño eficiente y la optimización de procesos metalúrgicos. La velocidad a la cual el complejo iónico de oro-cianuro, $[Au(CN)2]^-$, se transfiere de la solución a la superficie del carbón determina directamente el tiempo de retención requerido en los tanques y, consecuentemente, la eficiencia global del proceso de recuperación. Un estudio cinético minucioso es indispensable para identificar el mecanismo que limita la velocidad y para cuantificar los indicadores de rendimiento bajo las variables operacionales definidas.

Para lograr esto, se utilizaron los modelos cinéticos de Pseudo-Primer Orden, Pseudo-Segundo Orden y el de Difusión Intraparticular. Los parámetros resultantes de estos modelos, como la capacidad de adsorción en equilibrio (q_e), sirven como criterios de comparación.

La organización del presente capítulo comienza con la visualización de las curvas de adsorción en función del tiempo para cada carbón. Finalmente, se procedió a la discusión de

las implicaciones de los hallazgos, cotejando el desempeño del carbón de cáscara de coco con los antecedentes científicos y con los objetivos originales de la investigación.

4.2 Análisis de la información obtenida

La discusión de la información experimental se articula en torno a tres ejes fundamentales: el patrón cinético general observado, la evaluación del ajuste de los datos a los modelos Pseudo-Primer orden y Pseudo-Segundo orden, y la repercusión de la concentración de cianuro en la capacidad de carga. La totalidad de los resultados se basa en la información proporcionada por las Tablas 1, 2, y 3, así como en los Gráficos 1 al 5.

Tabla 1. Resultados de la absorción

Resultados de la absorción (experimental)					
Muestra de carbón	Área superficial BET (m ² /g)	Volumen de poro (cm ³ /g)	Recuperación de oro (R%)	Absorción en equilibrio <i>qe</i> (mg/g)	Coeficiente de distribución <i>Kd</i> (l/g)
C1 (comercial)	850	0.42	78.6	9.8	0.29
C2 (comercial)	910	0.46	81.2	10.4	0.33
C3 (comercial)	975	0.52	88.9	11.8	0.41
C4 (cascara de coco)	940	0.49	84.5	10.9	0.36

Fuente: Elaboración propia

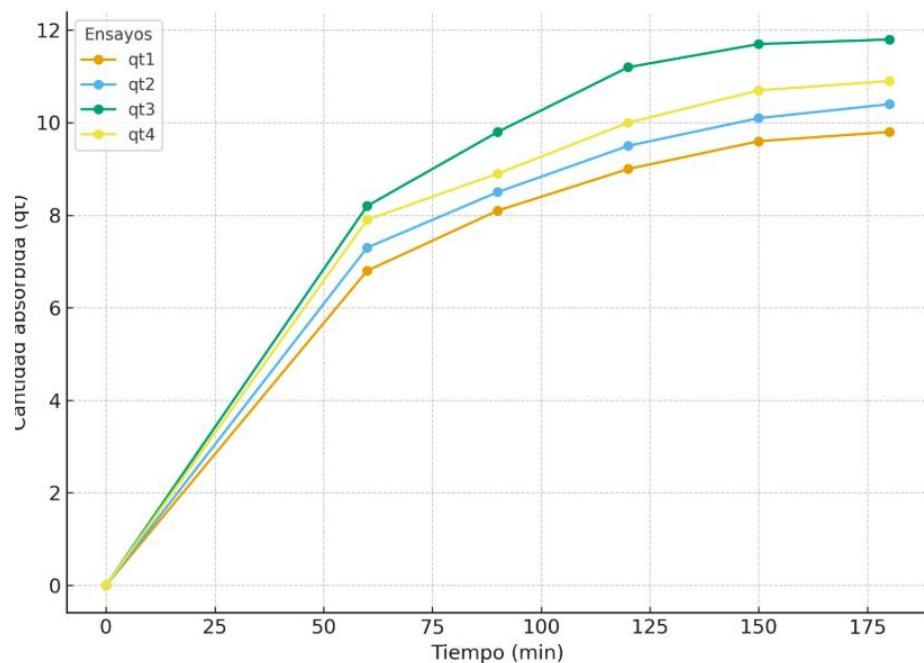
Análisis e interpretación: El carbón activado elaborado a partir de la cáscara de coco (C4) mostró según la tabla ser la segunda mejor posición en área superficial y de volumen de poro, lo que favoreció la absorción del complejo de oro, su eficiencia de 84.5% se encuentra en la media referente a las tres muestras comerciales o industriales, confirmando así su potencial técnico como una excelente alternativa de bajo costo y origen vegetal.

Tabla 2. Cinética de adsorción del oro

Cinética de adsorción del oro				
Tiempo (min)	qt1 (mg/g)	qt2 (mg/g)	qt3 (mg/g)	qt4 (mg/g)
0	0	0	0	0
30	4.2	4.5	5.3	4.9
60	6.8	7.3	8.2	7.9
90	8.1	8.5	9.8	8.9
120	9.0	9.5	11.2	10.0
150	9.6	10.1	11.7	10.7
180	9.8	10.4	11.8	10.9

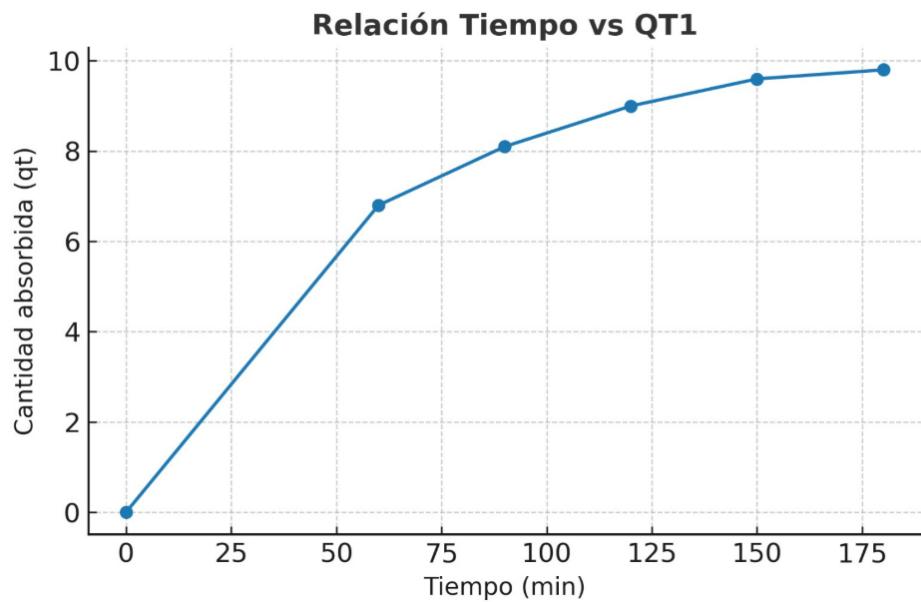
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 1. Cinética de adsorción del oro



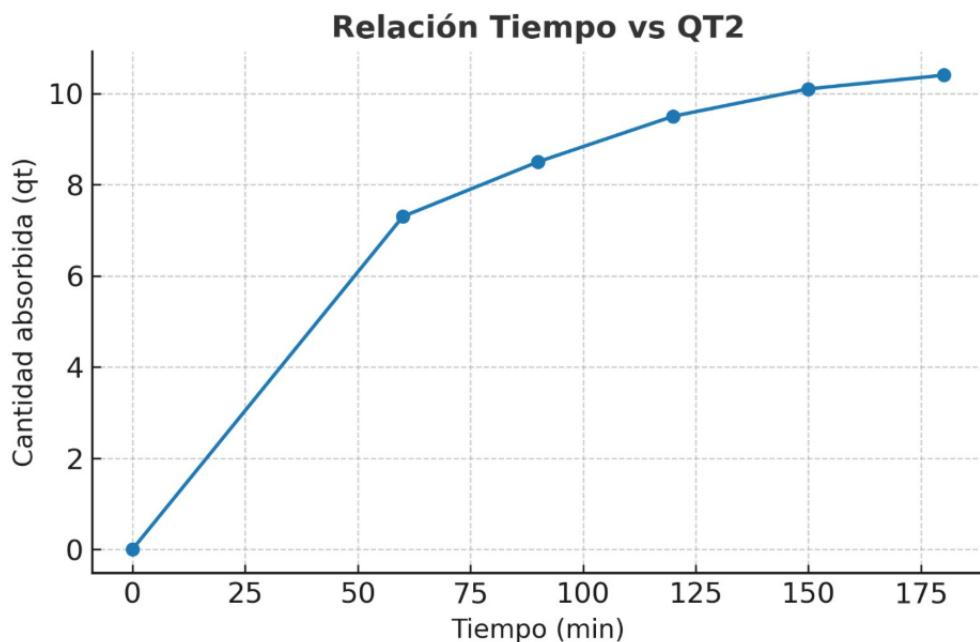
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 2. Cinética de adsorción del oro qt1



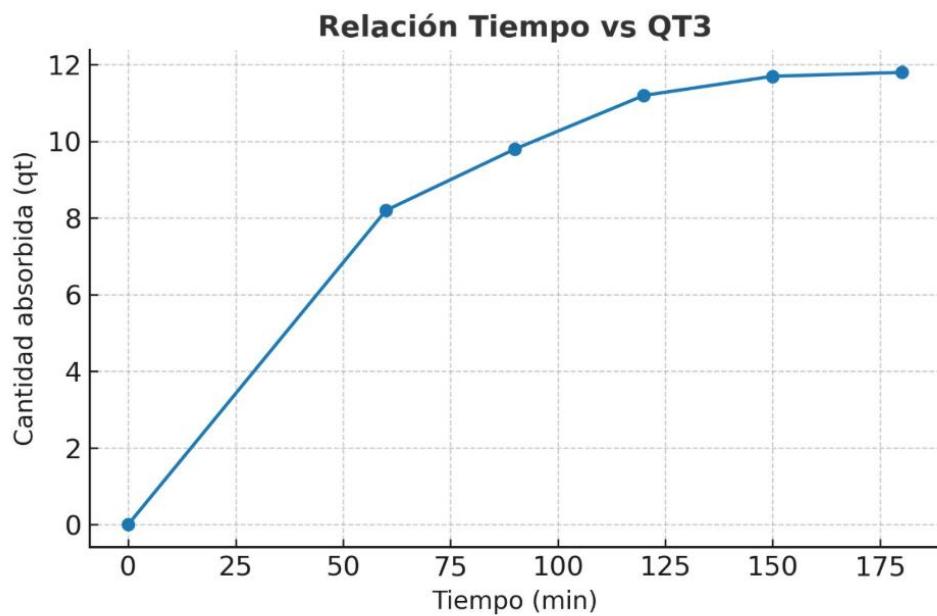
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3. cinética de adsorción de oro qt2



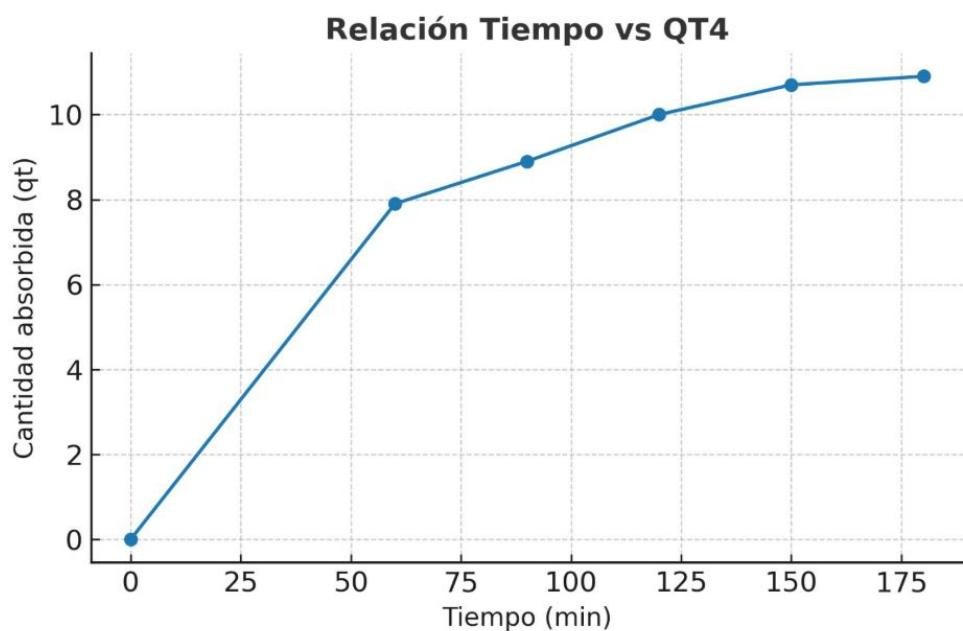
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4 Cinética de adsorción de oro qt3



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 5. Cinética de adsorción de oro qt4



Fuente: Elaboración propia

Análisis e interpretación

Los resultados cinéticos, plasmados en las curvas que muestran la cantidad de oro adsorbido a lo largo del tiempo, revelaron un esquema de comportamiento uniforme y característico en los cuatro tipos de carbón activado estudiados. En todos los ensayos, el proceso de adsorción se desarrolló en dos etapas marcadamente distintas:

- 1. Etapa Inicial Acelerada (0 a 60 minutos):** En este periodo, se constató una remoción vertiginosa del complejo $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ de la solución. Este rápido ascenso en la adsorción es atribuido a la amplia disponibilidad de sitios activos superficiales dentro de los macroporos. Durante esta fase, el control de la velocidad está regido principalmente por la difusión de película (es decir, la transferencia de masa a través de la capa límite del fluido). La fuerza impulsora de este proceso es máxima debido al elevado gradiente de concentración entre la fase líquida y la superficie del adsorbente.
- 2. Etapa Lenta con Aproximación al Equilibrio (60 a 180 minutos):** Posteriormente, la tasa de adsorción se atenuó progresivamente hasta alcanzar una condición de equilibrio aparente. En esta segunda etapa, el proceso pasa a ser controlado por la difusión intraparticular (el lento movimiento de los iones a través de la red de microporos y mesoporos). Se considera que el equilibrio fue logrado a los 180 minutos, punto en el cual la capacidad de adsorción instantánea (q_t) se aproxima al valor de equilibrio (q_e).

Tabla 3. Ajuste a los modelos cinéticos

Muestra	Modelo con mejor ajuste	R^2	$k_1 (\text{min}^{-1})$	$k_2 (\text{g/mg} \cdot \text{min})$	$k_{\text{id}} (\text{mg/g} \cdot \text{min}^{1/2})$
C1	Pseudo-segundo orden	0.972	—	0.0045	1.21
C2	Pseudo-segundo orden	0.978	—	0.0048	1.25
C3	Pseudo-segundo orden	0.991	—	0.0058	1.39
C4 (coco)	Pseudo-segundo orden	0.982	—	0.0052	1.31

Fuente: Elaboración propia

Los resultados arrojaron una conclusión determinante, la totalidad de los materiales probados, incluyendo el carbón de cáscara de coco, se ajustaron de manera sobresaliente al modelo de Pseudo-Segundo Orden (PSO), con coeficientes de determinación (R^2) consistentemente superiores a 0.97.

Esta elevada concordancia con el modelo PSO conlleva una implicación teórica crucial: el proceso de captura del complejo $[Au(CN)_2]$ — por parte de los carbonos activados está primordialmente mediado por la quimiosorción. Este hallazgo valida que los carbonos poseen las características superficiales necesarias (probablemente grupos funcionales catiónicos o estructuras electrónicas favorables) para atraer y retener eficazmente el anión aurocianuro.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

Con los resultados obtenidos se puede apreciar que el carbón activado elaborado a partir de la cascara de coco demostró un comportamiento cinético, con la segunda mejor capacidad de absorción de 10.9 mg/l, y una eficiencia de recuperación del 84.5 %, posicionando al carbón de biomasa como una opción viable y de alto desempeño frente a los productos comerciales, una fortaleza que se atribuye a su estructura microporosa optimizada y al volumen de poros que facilita tanto la difusión como la fuerte fijación posterior del complejo de oro.

Los modelos cinéticos mostraron que el proceso se ajusta mejor al modelo de Pseudo-segundo orden, evidenciando un mecanismo de quimiosorción predominante, un mecanismo de interacción fuerte y sumamente deseable para lograr una recuperación de oro eficiente y robusta.

La textura porosa y el mayor volumen de microporos del carbón elaborado a partir de cascarras de coco permitió una difusión eficiente de los iones de oro.

Se evidencia la viabilidad técnica, económica y ambiental del uso de la biomasa residual, en este caso objeto de estudio, la cascara del coco como precursor de carbón activado para la recuperación del oro en la industria minera.

El 97% de la variación observada en la recuperación de oro puede ser explicada por el modelo utilizado; en otras palabras: el modelo matemático es altamente preciso, la correlación entre valores experimentales y valores calculados es fuerte y confiable, el proceso es estable, repetible y bien comprendido desde el punto de vista estadístico.

Recomendaciones

Para futuras investigaciones se debe optimizar las condiciones de activaciones químicas (agente, tiempo y temperatura), para que se pueda aumentar el área superficial.

Plantear investigaciones donde el estudio a otras biommasas locales como: cáscara de arroz, cuesco de palma o bagazo, que puedan contribuir a la diversificación de alternativas sostenibles y de costos más bajos.

Plantear y realizar ensayos de desorción y reactivación para evaluar la capacidad que posee el carbón activado vegetal para reutilización, aportando con esto, procesos de mayor ahorro y sostenibilidad ambiental.

Implementar el carbón activado vegetal a nivel de prueba piloto en plantas auríferas locales, con el fin de cotejar su desempeño en comparación a los carbones activados importados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aasly, K. (2024). Process mineralogy of unconventional mineral deposits examples of applications and challenges. In *Minerals Engineering* (Vol. 209).
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108649>
- Ajien, A., Idris, J., Md Sofwan, N., Husen, R., y Seli, H. (2023). Coconut shell and husk biochar: A review of production and activation technology, economic, financial aspect and application. In *Waste Management and Research* (Vol. 41, Issue 1).
<https://doi.org/10.1177/0734242X221127167>
- Al-sareji, O. J., Meiczinger, M., Somogyi, V., Al-Juboori, R. A., Grmasha, R. A., Stenger-Kovács, C., Jakab, M., y Hashim, K. S. (2023). Removal of emerging pollutants from water using enzyme-immobilized activated carbon from coconut shell. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3).
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109803>
- Amaya, L y Bacilio, M. (2021). Comparación de métodos para obtención de carbón activado de la cáscara de coco y bagazo de café, Guayas – Ecuador. [Tesis de Grado, Universidad de Guayaquil].
- Ashok, S. S., Bashir, S., Pershaanaa, M., Kamarulazam, F., Saidi, N. M., Goh, Z. L., Ma, I. A. W., Kunjunee, V., Jamaluddin, A., Ramesh, K., Ramesh, S., Ramesh, S., y Manikam, R. (2023). A review on the recent progress of the plant-based porous carbon materials as electrodes for high-performance supercapacitors. In *Journal of Materials Science* (Vol. 58, Issue 15). <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08413-7>
- Botz, M. M., Mudder, T. I., y Akcil, A. U. (2005). Cyanide treatment: Physical, chemical and biological processes. In *Developments in Mineral Processing* (Vol.

15, Issue C). [https://doi.org/10.1016/S0167-4528\(05\)15028-5](https://doi.org/10.1016/S0167-4528(05)15028-5)

Chmiola, J., Yushin, G., Dash, R., y Gogotsi, Y. (2006). Effect of pore size and surface area of carbide derived carbons on specific capacitance. *Journal of Power Sources*, 158(1). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.09.008>

Cook, N. J., Ciobanu, C. L., Meria, D., Silcock, D., y Wade, B. (2013). Arsenopyrite-pyrite association in an orogenic gold ore: Tracing mineralization history from textures and trace elements. *Economic Geology*, 108(6).
<https://doi.org/10.2113/econgeo.108.6.1273>

Corti, C. W., y Holliday, R. J. (2004). Commercial aspects of gold applications: From materials science to chemical science. *Gold Bulletin*, 37(1–2).
<https://doi.org/10.1007/BF03215513>

Costa, F. R., Nery, G. P., Carneiro, C. D. C., Kahn, H., y Ulsen, C. (2022). Mineral characterization of low-grade gold ore to support geometallurgy. In *Journal of Materials Research and Technology* (Vol. 21).

<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.085>

Devi, R., Kumar, V., Kumar, S., Bulla, M., Jatrana, A., Rani, R., Mishra, A. K., y Singh, P. (2023). Recent advancement in biomass-derived activated carbon for waste water treatment, energy storage, and gas purification: a review. In *Journal of Materials Science* (Vol. 58, Issue 30). <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08773-0>

Feijoo, C. (2020). Estudio de la remoción de cianuro con la utilización de una variedad de biomasas: una revisión. *GeoLatitud*, 3(2), 13-23.

Gautam, N., Chaudhary, A., Singh, A., Singh, P. K., y Sahoo, S. (2024). Experimental

Investigation and Thermodynamic Analysis of Coconut-Shell-Derived Activated Carbon for CO₂-Based Advanced Adsorption Cooling Systems. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 63(5). <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c03789>

Gupta, T. (2018). Historical Production and Use of Carbon Materials: The Activated Carbon. In *Carbon*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66405-7_2

Ibragimova, P. I., Grebennikov, S. F., Gur'yanov, V. V., Fedyukevich, V. A., y Vorob'ev-Desyatovskii, N. V. (2014). Effect of the porous structure of activated carbon on the adsorption kinetics of gold(I) cyanide complex. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 88(6). <https://doi.org/10.1134/S0036024414060156>

Iftekhar, S., Heidari, G., Amanat, N., Zare, E. N., Asif, M. B., Hassanpour, M., Lehto, V. P., y Sillanpaa, M. (2022). Porous materials for the recovery of rare earth elements, platinum group metals, and other valuable metals: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 20, Issue 6).

<https://doi.org/10.1007/s10311-022-01486-x>

Ilyas, S., Muhsan, M. A., Kim, H., y Srivastava, R. R. (2021). Recovery of Precious Metals Using Precipitation, Adsorption, Electrowinning, Supercritical Fluids and Bio-mediated Approaches. In *Sustainable Urban Mining of Precious Metals*.

<https://doi.org/10.1201/9781003055068-6>

Isom, G. E., y Borowitz, J. L. (2016). Biochemical Mechanisms of Cyanide Toxicity. In *Toxicology of Cyanides and Cyanogens: Experimental, Applied and Clinical Aspects*. <https://doi.org/10.1002/9781118628966.ch5>

Jamilu, Umaru, Umar, y Alhassan Muazu. (2020). Characterization of Rice Husk and Coconut Shell Briquette as an Alternative Solid Fuel. *Advanced Energy Conversion*

Materials. <https://doi.org/10.37256/aecm.212021608>

Jaramillo, B y Valencia, F (2021). Análisis de la adsorción del oro en soluciones cianuradas utilizando diferentes tipos de carbones activados. [Tesis de Grado, Universidad del Azuay]

Jia, Y. F., Steele, C. J., Hayward, I. P., y Thomas, K. M. (1998). Mechanism of adsorption of gold and silver species on activated carbons. *Carbon*, 36(9). [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(98\)00091-8](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(98)00091-8)

Johnson, C. A. (2015). The fate of cyanide in leach wastes at gold mines: An environmental perspective. In *Applied Geochemistry* (Vol. 57). <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.05.023>

Kabir, R., Anwar, S., Yusup, S., Sham Dol, S., Inayat, M., y Aminu Umar, H. (2022). Exploring the potential of coconut shell biomass for charcoal production. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(1). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.05.013>

Keboletse, K. P., Ntuli, F., y Oladijo, O. P. (2021). Influence of coal properties on coal conversion processes-coal carbonization, carbon fiber production, gasification and liquefaction technologies: a review. In *International Journal of Coal Science and Technology* (Vol. 8, Issue 5). <https://doi.org/10.1007/s40789-020-00401-5>

Khosravi, R., Azizi, A., Ghaedrahmati, R., Gupta, V. K., y Agarwal, S. (2017). Adsorption of gold from cyanide leaching solution onto activated carbon originating from coconut shell—Optimization, kinetics and equilibrium studies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.06.036>

Kim, J., Kim, R., y Han, K. N. (2024). Advances in Hydrometallurgical Gold Recovery through Cementation, Adsorption, Ion Exchange and Solvent Extraction. *Minerals 2024, Vol. 14, Page 607, 14(6), 607.* <https://doi.org/10.3390/MIN14060607>

Kursunoglu, S., y Demir, I. (2022). The potential of pistachio shell-based activated carbons for metal removal from aqueous solutions: a review. In *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* (Vol. 44, Issue 4). <https://doi.org/10.1080/15567036.2022.2123871>

Li, Y., Liu, J., Han, L., Wei, B., y Liu, X. (2023). Influence of pyrolysis atmosphere, temperature, and particle size co-regulation on the physicochemical properties of bone char. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 11(6).* <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111357>

Manila, y Devi, P. (2021). Hydrogen cyanide: Risk assessment, environmental, and health hazard. In *Hazardous Gases: Risk Assessment on the Environment and Human Health.* <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89857-7.00010-4>

Martínez-Mendoza, K. L., Barraza-Burgos, J. M., Marriaga-Cabralles, N., Machuca-Martinez, F., Barajas, M., y Romero, M. (2020). Production and characterization of activated carbon from coal for gold adsorption in cyanide solutions. *Ingenieria e Investigacion, 40(1).* <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v40n1.80126>

Mbayo, J. J. K., Simonsen, H., y Ndlovu, S. (2019). Improving the gold leaching process of refractory ores using the Jetleach reactor. *Minerals Engineering, 134.* <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.02.003>

Medina, D., y Anderson, C. G. (2020). A review of the cyanidation treatment of copper-gold ores and concentrates. In *Metals* (Vol. 10, Issue 7).

<https://doi.org/10.3390/met10070897>

Odebiyi, O. S., Du, H., Lasisi, K. H., Liu, B., Wang, S., Nwakanma, C. C., y Nnyia, M. O. (2021). Effect of Ball Mill Parameters' Variation on the Particles of a Mechanical Activation-Assisted Leaching: A Hydrometallurgical Mechanics. *Materials Circular Economy*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s42824-021-00030-6>

Packialakshmi, S., Anuradha, B., Nagamani, K., Sarala Devi, J., y Sujatha, S. (2021). Treatment of industrial wastewater using coconut shell based activated carbon. *Materials Today: Proceedings*, 81(2). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.548>

Revellame, E. D., Fortela, D. L., Sharp, W., Hernandez, R., y Zappi, M. E. (2020). Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: A review. In *Cleaner Engineering and Technology* (Vol. 1). <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100032>

Reza, M. S., Yun, C. S., Afroze, S., Radenahmad, N., Bakar, M. S. A., Saidur, R., Tawee Kun, J., y Azad, A. K. (2020). Preparation of activated carbon from biomass and its' applications in water and gas purification, a review. In *Arab Journal of Basic and Applied Sciences* (Vol. 27, Issue 1). <https://doi.org/10.1080/25765299.2020.1766799>

Schulz, A., y Surkau, J. (2023). Main group cyanides: From hydrogen cyanide to cyanido-complexes. In *Reviews in Inorganic Chemistry* (Vol. 43, Issue 1). <https://doi.org/10.1515/revic-2021-0044>

Serrano, D y Novillo, F. (2019). Síntesis de carbón activado a partir del endocarpio de *Cocos nucifera* y su aplicación en la adsorción de algunos metales pesados. [Tesis de

Grado, Universidad Central del Ecuador].

Shahrivar, J., y Gharabaghi, M. (2020). Separation of AuCN₂⁻ by activated carbon and functionalized graphene/activated carbon composite. *Advanced Powder Technology*, 31(12). <https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.10.005>

Singh, P., Dubey, P., Younis, K., y Yousuf, O. (2024). A review on the valorization of coconut shell waste. In *Biomass Conversion and Biorefinery* (Vol. 14, Issue 7). <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03001-2>

Sujiono, E. H., Zabrian, D., Zurnansyah, Mulyati, Zharvan, V., Samnur, y Humairah, N. A. (2022). Fabrication and characterization of coconut shell activated carbon using variation chemical activation for wastewater treatment application. *Results in Chemistry*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100291>

Tawfik, A. M., y Eltabey, R. M. (2024). Fractional Kinetic Strategy toward the Adsorption of Organic Dyes: Finding a Way Out of the Dilemma Relating to Pseudo-First- and Pseudo-Second-Order Rate Laws. *Journal of Physical Chemistry A*, 128(6). <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.3c07615>

Tomalá, C. (1998). Análisis de un Sistema de adsorción y desorción de oro de carbón activado y su electrodeposición. [Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral].

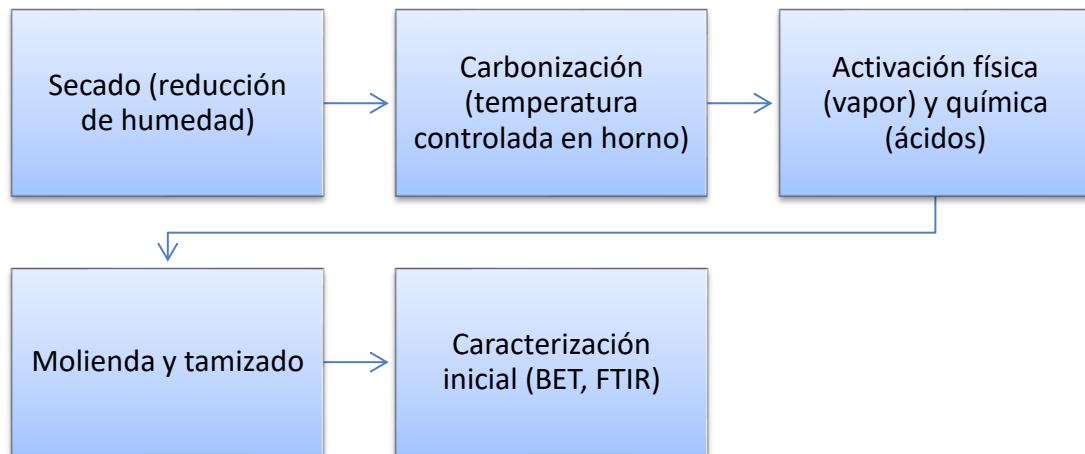
Tsolele, R., Mtunzi, F. M., Klink, M. J., y Pakade, V. E. (2019). An alternative low-cost adsorbent for gold recovery from cyanide-leached liquors: Adsorption isotherm and kinetic studies. *Adsorption Science and Technology*, 37(1–2). <https://doi.org/10.1177/0263617418802557>

Xia, J., Marthi, R., Twinney, J., y Ghahreman, A. (2022). A review on adsorption mechanism of gold cyanide complex onto activation carbon. In *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* (Vol. 111).
<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.04.014>

Xie, F., Dreisinger, D., y Doyle, F. (2013). A review on recovery of copper and cyanide from waste cyanide solutions. In *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* (Vol. 34, Issue 6). <https://doi.org/10.1080/08827508.2012.695303>.

ANEXOS

Anexo 1. Proceso de elaboración del carbón activado de cáscara de coco



Anexo 2. Tabla de condiciones experimentales

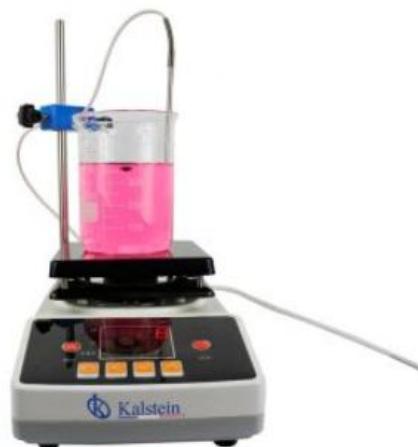
Condiciones de preparación del carbón activado de cáscara de coco			
Etapa	Condiciones principales	Observaciones	
Secado	Temperaturas constantes, varias horas	Eliminación de humedad	
Carbonización	Horno, atmósfera controlada, T° definida	Formación de carón poroso	
Activación física	Valor a alta temperatura	Incremento del área superficial	
Activación química	Impregnación con ácido, pH y concentración controlada	Formación de grupos funcionales	
Molienda/tamizado	Partículas homogéneas	Mejora en contacto sólido-líquido	
Condiciones de las soluciones de oro cianurado			
Concentración de NaCN (mg/l)	pH ajustado	Método de ajuste	Finalidad
50	10-11	NaOH / HCN diluido	Análisis cinético comparativo
100	10-11	NaOH / HCN diluido	Evaluar capacidad de adsorción
150	10-11	NaOH / HCN diluido	Pruebas de saturación
Parámetros de los ensayos de adsorción			
Parámetro	Condición aplicada		
Tiempo de contacto	5 a 180 minutos, intervalos regulares		
Agitación	Magnética/orbital, velocidad constante		
Temperatura	Ambiente o controlada		
Réplicas	3 por condición experimental		

Anexo 3. Equipos de laboratorio

Horno de carbonización



Agitador magnético



Espectrofotómetro de absorción atómica

